

(2)

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 11-150996

(43)Date of publication of application : 02.06.1999

(51)Int.Cl.

H02P 21/00

(21)Application number : 09-312052

(71)Applicant : TOYOTA MOTOR CORP

(22)Date of filing : 13.11.1997

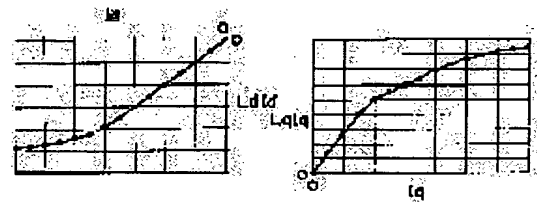
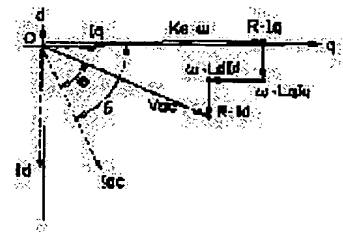
(72)Inventor : URANO HIROAKI  
AKAO NORIHIKO

## (54) MOTOR CONTROLLER

## (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To control a motor more accurately, by coping with nonlinearity of each coefficient appearing in a torque equation.

SOLUTION: The information indicating nonlinearity of d- and q-axis primary inductances  $L_d$  and  $L_q$  of a motor against d- and q-axis currents  $I_d$  and  $I_q$  of the motor is found through experiments, etc., and when the motor is actually controlled, the current command (vector) to the motor is decided by utilizing the information. Since the nonlinearity of the d- and q-axis primary inductances of the motor is reflected in the control of the motor, the motor can be controlled more accurately.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-150996

(43) 公開日 平成11年(1999) 6月2日

(51) Int.Cl.<sup>8</sup>  
H 0 2 P 21/00

識別記号

F I  
H 0 2 P 5/408

A

審査請求 未請求 請求項の数 4 O L (全 9 頁)

(21) 出願番号 特願平9-312052  
(22) 出願日 平成9年(1997)11月13日

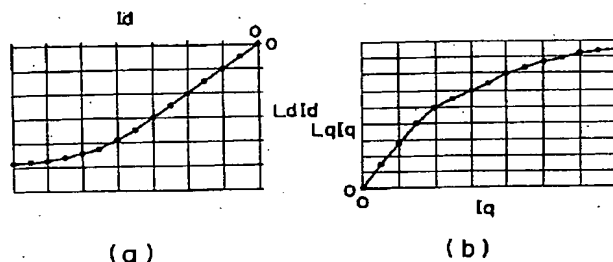
(71) 出願人 000003207  
トヨタ自動車株式会社  
愛知県豊田市トヨタ町1番地  
(72) 発明者 浦野 広暁  
愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内  
(72) 発明者 赤尾 憲彦  
愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内  
(74) 代理人 弁理士 吉田 研二 (外2名)

(54) 【発明の名称】 モータ制御装置

(57) 【要約】

【課題】 トルク方程式にあらわれる各係数の非線形性に対処し、より正確なモータ制御を実行可能にする。

【解決手段】 モータの d, q 各軸電流  $I_d$ ,  $I_q$  に対する d, q 各軸一次インダクタンス  $L_d$ ,  $L_q$  の非線形性をあらわす情報を実験等により求め、モータの実制御時には、この情報を利用してモータに対する電流指令（ベクトル）を決定する。d, q 各軸一次インダクタンスの非線形性が制御に反映されることになるためより正確な制御を実行可能になる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 一次電流ベクトル、 $d$ 、 $q$ 各軸一次インダクタンス及び界磁起磁力により定まる出力トルクの値がその制御目標たるトルク指令に一致することとなるよう、かつ、一次電流ベクトルによる $d$ 、 $q$ 各軸一次インダクタンスの変動を表す情報を利用して、一次電流ベクトルの制御目標たる電流指令ベクトルを決定する電流指令決定手段と、

決定された電流指令ベクトルに従いモータの一次電流をベクトル制御する手段と、

を備えることを特徴とするモータ制御装置。

【請求項2】 請求項1記載のモータ制御装置において、

$d$ 軸、 $q$ 軸又は両軸の一次インダクタンスに対するモータ巻線単位巻き数当たり鎖交磁束数の関係を示す情報を、一次電流ベクトルによる $d$ 、 $q$ 各軸一次インダクタンスの変動を表す情報として、上記電流指令決定手段に与える手段を備えることを特徴とするモータ制御装置。

【請求項3】 請求項1又は2記載のモータ制御装置において、

一次電流ベクトルによる界磁起磁力の変動を表す情報を上記電流指令決定手段に与える手段を備え、

上記電流指令決定手段が、一次電流ベクトルによる $d$ 、 $q$ 各軸一次インダクタンスの変動を表す情報に加え一次電流ベクトルによる界磁起磁力の変動を表す情報を利用して、電流指令ベクトルを決定することを特徴とするモータ制御装置。

【請求項4】 請求項1乃至3記載のモータ制御装置において、

電源電圧、トルク指令及びモータ回転数の組合せと、決定された電流指令ベクトルに従いモータの一次電流をベクトル制御した場合にそのときのモータ回転数においてモータの端子電圧が電源電圧相当値以下になりかつ一次電流ベクトルの絶対値又は $d$ 軸若しくは $q$ 軸成分が最小となるという条件を満たす一次電流ベクトルと、を対応付ける情報を、上記電流指令決定手段に与える電流指令最適化手段を備え、

上記電流指令決定手段が、現在の電源電圧、トルク指令及びモータ回転数に関する情報並びに上記電流指令最適化手段から与えられた情報に従い電流指令ベクトルを決定することを特徴とするモータ制御装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、電圧方程式及びトルク方程式に基づきモータを制御するモータ制御装置に関する。

【0002】

【従来の技術】モータの一次電流を制御する方法として、相直交する2本の軸 $d$ 、 $q$ に沿って一次電流 $I_{ac}$ をベクトル分解し、 $d$ 軸電流 $I_d$ 及び $q$ 軸電流 $I_q$ から構成さ

れる一次電流ベクトル( $I_d$ 、 $I_q$ )に関し制御を行うベクトル制御が周知である。モータの出力トルク $T$ は、

$$\text{【数1】 } T = K_e \cdot I_q + (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q$$

但し、 $L_d$ 、 $L_q$ ：モータの $d$ 、 $q$ 各軸一次インダクタンス

$K_e$ ：界磁起磁力

なるトルク方程式により表すことができるため、一次電流 $I_{ac}$ に関するベクトル制御を通じて、モータの出力トルク $T$ を制御することができる。

10 【0003】この制御は、電気自動車の走行用モータの制御系のように、車両操縦者によるペダル操作に応じてモータからトルク $T$ を出力させる必要がある用途で、利用されている。即ち、この種の用途においては、まず、車両操縦者によるペダル操作に応じて出力トルク $T$ の制御目標たるトルク指令 $T^*$ を決定する。次に、決定されたトルク指令 $T^*$ に基づき、かつ上掲のトルク方程式を利用して、一次電流ベクトル( $I_d$ 、 $I_q$ )の制御目標たる電流指令ベクトル( $I_d^*$ 、 $I_q^*$ )を決定する。更に、決定した電流指令ベクトル( $I_d^*$ 、 $I_q^*$ )に基づきモータの一次電流 $I_{ac}$ をその $d$ 、 $q$ 各軸成分毎に制御する。これによって、トルク指令 $T^*$ をモータの実出力トルク $T$ として実現できる。

【0004】また、決定した電流指令ベクトル( $I_d^*$ 、 $I_q^*$ )を決定する際には、特開平7-107772号公報に記載されているように、電源電圧に基づく制限を課すのが望ましい。即ち、電気自動車の走行用モータの制御系のようにバッテリーの電圧 $V_b$ をインバータにて交流に変換しモータの端子間に印加するシステムにおいては、決定した電流指令ベクトル( $I_d^*$ 、 $I_q^*$ )に従いモータの一次電流 $I_{ac}$ のベクトル制御を行ったときにモータの端子間に現れる電圧 $V_{ac}$ が、バッテリー電圧相当値(=  $V_b \cdot \eta$ 、 $\eta$ はインバータにおける電圧利用率であり、三相の場合には $3^{1/2} / (2 \cdot 2^{1/2})$ であるが、制御論理により若干変化する)を上回ると、モータとバッテリーの間に存するインバータに負担がかかる等の支障が生じる。上掲の公報では、モータ回転数 $N$ が高い領域においてモータ逆起電力 $K_e \cdot \omega$ が増してもモータの端子電圧 $V_{ac}$ がバッテリー電圧相当値 $V_b \cdot \eta$ を上回ることがないように、かつ、 $d$ 軸電流 $I_d$ の絶対値の過剰による効率低下が生じないように、電流指令ベクトル( $I_d^*$ 、 $I_q^*$ )を決定している。具体的には、次の電圧方程式

$$\text{【数2】 } V_{ac} = (V_d^2 + V_q^2)^{1/2}$$

$$V_d = R \cdot I_d - \omega \cdot L_q \cdot I_q$$

$$V_q = \omega \cdot L_d \cdot I_d + R \cdot I_q + K_e \cdot \omega$$

但し、 $R$ ：モータ一次抵抗

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot p \cdot N / 60$ ：モータ軸角速度 (rad/s)

$N$ ：モータ回転数 (rpm)

$p$ ：極対数

50 を利用して、モータの端子電圧 $V_{ac}$ とバッテリー電圧相当

値 $V_b \cdot \eta$ との比較判別を行いながら、かつ、高回転領域ではモータ回転数 $N$ の増大に応じて $d$ 軸電流 $I_d$ の絶対値を増やす(逆起電力 $K_e \cdot \omega$ を打ち消す方向に励磁する)という弱め界磁制御論理に従って、電流指令ベクトル( $I_d^*$ ,  $I_q^*$ )を決定している。

#### 【0005】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上掲の公報による制御が正確に行われうるのは、電圧方程式に定数として現れている係数、即ち $d$ ,  $q$ 各軸一次インダクタンス $L_d$ ,  $L_q$ 、一次抵抗 $R$ 及び界磁起磁力 $K_e$ が、厳密に定数である場合のみである。実際には、例えば $d$ ,  $q$ 各軸一次インダクタンス $L_d$ ,  $L_q$ は、 $d$ ,  $q$ 各軸電流 $I_d$ ,  $I_q$ が変化すると変化する。

【0006】本発明は、このような問題点を解決することを課題としてなされたものであり、電圧方程式中の各種の係数に現れる変動をモータ一次電流のベクトル制御に組み込む具体的な手法を提案することにより、従来に比べ精度の高い制御を実現することを目的とする。

#### 【0007】

【課題を解決するための手段】このような目的を達成するため、本発明に係るモータ制御装置は、一次電流ベクトル( $I_d$ ,  $I_q$ )、 $d$ ,  $q$ 各軸一次インダクタンス $L_d$ ,  $L_q$ 及び界磁起磁力 $K_e$ により定まる出力トルク $T$ の値がその制御目標たるトルク指令 $T^*$ に一致することとなるよう、かつ、一次電流ベクトル( $I_d$ ,  $I_q$ )による $d$ ,  $q$ 各軸一次インダクタンス $L_d$ ,  $L_q$ の変動を表す情報を利用して、一次電流ベクトル( $I_d$ ,  $I_q$ )の制御目標たる電流指令ベクトル( $I_d^*$ ,  $I_q^*$ )を決定する電流指令決定手段と、決定された電流指令ベクトル

( $I_d^*$ ,  $I_q^*$ )に従いモータの一次電流 $I_{ac}$ をベクトル制御する手段と、を備えることを特徴とする。この構成においては、電圧方程式に現れる各種の係数のうち $d$ ,  $q$ 各軸一次インダクタンス $L_d$ ,  $L_q$ において一次電流ベクトル( $I_d$ ,  $I_q$ )の変化に伴い現れる変化が、電流指令ベクトル( $I_d^*$ ,  $I_q^*$ )を決定する段階で、一次電流 $I_{ac}$ のベクトル制御に反映される。従って、この構成においては、一次電流ベクトル( $I_d$ ,  $I_q$ )による $d$ ,  $q$ 各軸一次インダクタンス $L_d$ ,  $L_q$ の変化によってモータの一次電流 $I_{ac}$ ひいては出力トルク $T$ に現れる制御誤差が、抑制され、従来に比べ精度の高い制御が実現される。

【0008】本発明の構成としては、 $d$ ,  $q$ 各軸一次インダクタンス $L_d$ ,  $L_q$ に対するモータ巻線単位巻き数当たり鎖交磁束数の関係を計測等により予め得ておき、実制御時にはモータ巻線単位巻き数当たり鎖交磁束数(=インダクタンス×電流の次元を有する量)を $d$ 軸電流 $I_d$ 若しくは $q$ 軸電流 $I_q$ にて除算することにより $d$ ,  $q$ 各軸一次インダクタンス $L_d$ ,  $L_q$ を求め、求めた $d$ ,  $q$ 各軸一次インダクタンス $L_d$ ,  $L_q$ を電流指令ベクトル( $I_d^*$ ,  $I_q^*$ )の決定に利用する、といった構成も考え得

る。しかし、この構成においては、 $d$ 軸電流 $I_d$ 若しくは $q$ 軸電流 $I_q$ が微小な領域で、0に近い値での除算という処理即ち誤差を発生させやすい演算処理が行われることとなる。従って、本発明に係るモータ制御装置を実現する際には、更に、 $d$ 軸の一次インダクタンス $L_d$ 、 $q$ 軸の一次インダクタンス $L_q$ 又は両軸の一次インダクタンスの組合せ( $L_d$ ,  $L_q$ )に対するモータ巻線単位巻き数当たり鎖交磁束数の関係を示す情報を、一次電流ベクトル( $I_d$ ,  $I_q$ )による $d$ ,  $q$ 各軸一次インダクタンス $L_d$ ,  $L_q$ の変動を表す情報として、上記電流指令決定手段に与える手段を設けるのが好ましい。このように、インダクタンス×電流の次元を有する量を、 $d$ 軸電流 $I_d$ 若しくは $q$ 軸電流 $I_q$ による除算を経ずにそのまま利用することによって、誤差を更に抑制することができる。

【0009】本発明に係るモータ制御装置を実現する際には、更に、一次電流ベクトル( $I_d$ ,  $I_q$ )による界磁起磁力 $K_e$ の変動を表す情報を上記電流指令決定手段に与える手段を設けるのが好ましい。この構成においては、電流指令決定手段が、一次電流ベクトル( $I_d$ ,  $I_q$ )による $d$ ,  $q$ 各軸一次インダクタンス $L_d$ ,  $L_q$ の変動を表す情報に加え、一次電流ベクトル( $I_d$ ,  $I_q$ )による界磁起磁力 $K_e$ の変動を表す情報を利用して、電流指令ベクトル( $I_d^*$ ,  $I_q^*$ )を決定する。このようにすることによって、電圧方程式に現れる各種の係数のうち界磁起磁力 $K_e$ において一次電流ベクトル( $I_d$ ,  $I_q$ )の変化に伴い現れる変化が、電流指令ベクトル( $I_d^*$ ,  $I_q^*$ )を決定する段階で、一次電流 $I_{ac}$ のベクトル制御に反映されるから、一次電流ベクトル( $I_d$ ,  $I_q$ )による界磁起磁力 $K_e$ の変化によってモータの一次電流 $I_{ac}$ ひいては出力トルク $T$ に現れる制御誤差が抑制され、更に精度の高い制御が実現される。

【0010】本発明に係るモータ制御装置を実現する際には、更に、電源電圧 $V_b$ 、トルク指令 $T^*$ 及びモータ回転数 $N$ の組合せ( $V_b$ ,  $T^*$ ,  $N$ )と、決定された電流指令ベクトル( $I_d^*$ ,  $I_q^*$ )に従いモータの一次電流 $I_{ac}$ をベクトル制御した場合にそのときのモータ回転数 $N$ においてモータの端子電圧 $V_b$ が電源電圧相当値 $V_b \cdot \eta$ 以下になりかつ一次電流ベクトル( $I_d$ ,  $I_q$ )の絶対値 $I_{ac}$ 又は $d$ 軸若しくは $q$ 軸成分 $I_d$ ,  $I_q$ が最小となるという条件を満たす一次電流ベクトル( $I_d$ ,  $I_q$ )とを対応付ける情報を、上記電流指令決定手段に与える電流指令最適化手段を設けるのが好ましい。この構成においては、電流指令決定手段が、現在の電源電圧 $V_b$ 、トルク指令 $T^*$ 及びモータ回転数 $N$ に関する情報並びに電流指令最適化手段から与えられた情報に従い、電流指令ベクトル( $I_d^*$ ,  $I_q^*$ )を決定する。従って、電圧方程式中の係数の変動による誤差を抑えるという本発明の特徴に係る処理に加え、前掲の公報において実行されていた弱め界磁制御(電源電圧相当値 $V_b \cdot \eta$ によるモータ端子電圧 $V_{ac}$ の制限を含む)を、実現できる。更に、電流指

令最適化手段は  $(V_b, T^*, N)$  と  $(I_d, I_q)$  とを対応付ける機能を有する手段（いわばテーブル又はマップ）であるから、演算処理により同等の作用効果を生じさせる構成に比べ、装置構成が簡素になりまた電流指令決定手段における処理が簡素化・高速化する。

【0011】なお、以上の記述においては、各数量乃至情報に関し記号を用いて表した。これは理解を容易にするためであって、本発明の要旨を限定する趣旨ではない。例えば、電源電圧相当値を表す際に記号  $V_b \cdot \eta$  を用いたが、これは電源をバッテリーに限定する趣旨でもまたインバータの使用を必須とする趣旨でもない。更に、 $d, q$  各軸成分に分解し制御する態様のベクトル制御を示しているが、振幅及び位相の各成分に分解し制御する態様のベクトル制御も存する。 $d, q$  各軸による表現から振幅及び位相による表現への変更は当業者にとり容易であるから、本願でいうところの  $d, q$  各軸によるベクトル制御は振幅及び位相によるベクトル制御をも暗示的に含んでいるものとし、本発明はその種のベクトル制御への応用も包含するものとする。

#### 【0012】

【発明の実施の形態】以下、本発明の好適な実施形態に関し図面にに基づき説明する。なお、各実施形態間で共通する構成には同一の符号を付し説明を省略する。

【0013】図1に、本発明の一実施形態に係るモータ制御装置の構成を示す。この図に示されている装置は、例えば電気自動車の駆動系として用いることができる。図中のモータ10は、例えば永久磁石によって励磁される三相交流モータであり、インバータ12を介してバッテリー14から供給される電力によって駆動される。インバータ12は図示しない所定個数のスイッチング素子を内蔵しており、これらスイッチング素子のスイッチング動作によって、バッテリー14の出力に関し直流から三相交流への電力変換を行い、モータ10に供給すべき三相交流電力を生じさせている。

【0014】インバータ12における電力変換動作は、電流演算部16やインバータ制御部18によって制御されている。すなわち、図示しない回路において例えば車両操縦者のアクセルペダル操作に応じトルク指令  $T^*$  が生成されると、電流演算部16は、このトルク指令  $T^*$  に応じたトルク  $T$  がモータ10から出力されることとなるよう、電流指令ベクトル  $(I_d^*, I_q^*)$ 、更には  $U, V, W$  各相にかかる電圧指令  $V_u^*, V_v^*, V_w^*$  を発生させ、インバータ制御部18はこれらの電圧指令  $V_u^*, V_v^*, V_w^*$  に応じて  $U, V, W$  各相にかかるPWM（パルス幅変調）信号を生じさせる。インバータ12に内蔵されるスイッチング素子はこのPWM信号により駆動される。これによって、モータ10からは、トルク指令  $T^*$  に応じた出力トルク  $T$  が得られる。

【0015】電流演算部16は、電圧指令  $V_u^*, V_v^*, V_w^*$  を生成するに際して、電流検出器20u, 20v,

20w、ロータ位置検出器22、電圧検出器24等の出力を入力しこれらを利用する。電流検出器20u, 20v, 20wはモータ10の  $U, V, W$  各相に対応して設けられており、これらの電流検出器20u, 20v, 20wによって、モータ10の  $U, V, W$  の各相に流れる電流  $I_u, I_v, I_w$  が検出される。また、ロータ位置検出器22は、モータ10のロータの角度位置を検出するセンサであり、その出力は、モータ10の回転数  $N$  に変換することが可能である。そして、電圧検出器24は、バッテリー14の両端間の電圧  $V_b$  を検出するセンサである。電流演算部16は、搭載している電流指令計算ルーチン  $IDIQCAL100$  を用いトルク指令  $T^*$  から電流指令ベクトル  $(I_d^*, I_q^*)$  を決定し、電流検出器20u, 20v, 20wによって検出される電流  $I_u, I_v, I_w$  のフィードバックを受けて各相電圧指令  $V_u^*, V_v^*, V_w^*$  を決定する。また、バッテリー電圧  $V_b$  は、ルーチン  $IDIQCAL100$  を実行する際に、バッテリー電圧  $V_b$  に基づく電流指令決定のために用いられる。

【0016】図2に、本実施形態における電流演算部16の動作の流れを示す。この図に示すように、電流演算部16はまずトルク指令  $T^*$ 、ロータ位置検出器22により検出されるロータ位置、バッテリー電圧  $V_b$ 、電流  $I_u, I_v, I_w$  を入力する（200）。電流演算部16は、電流検出器20u, 20v, 20wによって検出された電流  $I_u, I_v, I_w$  を、周知の手法によって三相二相変換し、 $d, q$  各軸電流のフィードバック値  $I_{d\_fb}, I_{q\_fb}$  を算出する（202）。また、電流演算部16は、ロータ位置検出器22により検出されたロータ位置からモータ回転数  $N$  を算出する（204）。

【0017】電流演算部16は、次に、後述するルーチン100を実行することにより、電流指令ベクトル  $(I_d^*, I_q^*)$  を算出する（206）。電流演算部16は、この電流指令ベクトル  $(I_d^*, I_q^*)$  の  $d, q$  各軸成分  $I_d^*, I_q^*$  が  $d, q$  各軸電流のフィードバック値（検出値） $I_{d\_fb}, I_{q\_fb}$  に対して有している偏差  $D I_d, D I_q$

【数3】  $D I_d = I_{d\_fb} - I_d^*, D I_q = I_{q\_fb} - I_q^*$  を演算する（208）。電流演算部16は、求めた偏差  $D I_d, D I_q$  を利用してPI（比例積分）演算を行い、これによって  $d, q$  各軸電圧指令  $V_d^*, V_q^*$  を決定する（210）。すなわち、電流演算部16は、次の式

$$\text{【数4】 } V_d^* = K_{pd} \cdot D I_d + \Sigma K_{id} \cdot D I_d, V_q^* = K_{pq} \cdot D I_q + \Sigma K_{iq} \cdot D I_q$$

の演算を行う。電流演算部16は、このようにして得られた  $d, q$  各軸電圧指令  $V_d^*, V_q^*$  を二相三相変換することにより  $U, V, W$  各相にかかる電圧指令  $V_u^*, V_v^*, V_w^*$  を算出し（212）、これらを前述のごとくインバータ制御部18に与える。

【0018】図3に、ステップ206にて実行されるルーチン  $IDIQCAL100$  の内容を示す。この図に示

す手順においては、電流演算部16はまずモータ全電流（実効値）をあらわす変数 $I_{ac}$ を0にリセットしたうえで（102）、この変数 $I_{ac}$ を所定の微小値 $\varepsilon_1$ だけ増加させるとともにq軸電流指令演算用の変数である $I_q$ に0をセットする（104）。電流演算部16は、変数 $I_{ac}$ を所定の微小値 $\varepsilon_2$ （ただし $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$ ）だけ増加させ（106）、次の式

$$【数5】 I_d \leftarrow (I_{ac}^2 - I_q^2)^{1/2}$$

の演算を行うことによって（108、110）、d軸電流指令を演算するための変数 $I_d$ に、ステップ104にて設定された $I_{ac}$ の下でステップ106にて設定された $I_q$ を実現するために必要なd軸電流を示す量を設定する。

【0019】電流演算部16は、次に、

$$【数6】 L_d I_d = f_1(I_d)$$

$$L_q I_q = f_2(I_q)$$

ただし、 $f_1$ 、 $f_2$ ：関数

$L_d I_d$ ：巻線1巻当り鎖交磁束数（d軸）

$L_q I_q$ ：巻線1巻当り鎖交磁束数（q軸）

であらわされる処理を実行することにより（112）、巻線1巻当り鎖交磁束数 $L_d I_d$ 、 $L_q I_q$ を求める。電流演算部16は、更に、次の式

$$【数7】 T = f_3(I_q, L_d I_d, L_q I_q)$$

ただし、 $f_3$ ：関数

の演算を行うことにより、ステップ106にて設定された $I_q$ 及びステップ110にて設定された $I_d$ のもとで発生するトルク $T$ を試算する（114）。電流演算部16は、試算したトルク $T$ がトルク指令 $T^*$ を上回るに至るまで、ステップ106以降の処理を繰り返す（116）。ただし、その過程で、次の式

$$【数8】 D = I_{ac}^2 - I_q^2$$

が負になった場合には（118）、 $I_d$ が虚数になるため実現不能とみなし、ステップ104に戻る。

【0020】電流演算部16は、トルク $T$ がトルク指令 $T^*$ を上回るに至った場合、ステップ110にて設定した $I_d$ 、ステップ106にて設定した $I_q$ 、ステップ112にて求めた $L_d I_d$ 、 $L_q I_q$ 並びにステップ204にて算出したモータ回転数 $N$ を用いて、次の式

$$【数9】 V_{ac} = \{ (K_e \cdot \omega + R \cdot I_q - \omega \cdot L_d I_d)^2 + (\omega \cdot L_q I_q + R \cdot I_d)^2 \}^{1/2}$$

の演算を行うことにより、モータ10の線間電圧 $V_{ac}$ を試算する（119）。電流演算部16は、線間電圧 $V_{ac}$ をバッテリー電圧相当値、すなわちバッテリー電圧 $V_b$ にインバータ12における電流利用率 $\eta$ を乗じた値と比較する（120）。前者が後者を下回っている場合には、これまでの手順にて得られた $I_d$ 及び $I_q$ をそれぞれd、q軸電流指令としてもバッテリー電圧相当値 $V_b \cdot \eta$ を上回る線間電圧 $V_{ac}$ は生じないと判断し、 $I_d$ をd軸電流指令 $I_d^*$ に、また $I_q$ をq軸電流指令 $I_q^*$ にそれぞれ設定する（122）。

【0021】なお、ステップ120において $V_{ac} \geq V_b \cdot \eta$ が成立すると判定された場合には、ステップ118において $D < 0$ となる旨判定された場合と同様、ステップ104に戻る。ステップ104に戻ると変数 $I_{ac}$ に更に $\varepsilon_1$ が加算され、上述の手順が再度繰り返されることになる。また、この繰り返しにもかかわらず、変数 $I_{ac}$ の値がモータ電流上限値 $I_{acmax}$ （これは例えばインバータ12の容量やモータ10の機械的強度により定まる）を上回るに至った場合には（124）、電流演算部16は、与えられているトルク指令 $T^*$ を現状では出力できないと判断し（126）、処理を終了する。

【0022】本実施形態の特徴の一つは、ルーチンID I QCAL100、特にステップ112及び114に記載されている処理にある。これらの処理は、d、q各軸電流 $I_d$ 、 $I_q$ が変化するとd、q各軸の一次インダクタンス $L_d$ 、 $L_q$ が変化するという非線形性を、電流指令ベクトル（ $I_d^*$ 、 $I_q^*$ ）の決定に反映させるためのルーチンである。

【0023】ここに、モータ10における電流・電圧ベクトルの関係は、図4のベクトル図の如き関係となるから、モータ10における巻線1巻当り鎖交磁束数 $L_d I_d$ 、 $L_q I_q$ は、次の式

$$【数10】 L_d I_d = \{ K_e \cdot \omega + R \cdot I_q - V_{ac} \cdot \cos(\theta + A \cdot \phi) \} / \omega$$

$$L_q I_q = \{ V_{ac} \cdot \sin(\theta + A \cdot \phi) - R \cdot I_d \} / \omega$$

ただし $A = -1$ （電圧に対し電流が進相のとき）

$= +1$ （電圧に対し電流が遅相のとき）

$\theta$ ：電流位相角

$\phi$ ：電圧電流の位相差

によって与えられる値となる。この式の右辺にあらわれる量は、全て、実験的に測定可能であるか、あるいは実験の過程で実験者が自ら設定すべき値か、いずれかである。従って、上の式に基づく実験を行うことにより、d、q各軸電流 $I_d$ 、 $I_q$ に対する巻線1巻当り鎖交磁束数 $L_d I_d$ 、 $L_q I_q$ の関係をあらかじめ知ることができる。また、この実験において同時にモータ10の出力トルク $T$ を測定しておくことにより、 $I_q$ 、 $L_d I_d$ 、 $L_q I_q$ の組合せと $T$ の間の対応関係をあらかじめ知ることができる。前述のステップ112及び114にて用いている関数 $f_1 \sim f_3$ は、この実験の結果から、重回帰分析等を用いて解析することによって、得ることができる。

【0024】このように、本実施形態によれば、d、q各軸一次インダクタンス $L_d$ 、 $L_q$ の非線形性を示すデータをあらかじめ実験等に基づき獲得しておき、電流指令ベクトル（ $I_d^*$ 、 $I_q^*$ ）を決定するに際してこれらの情報を利用するようにしたため、従来に比べ正確に、電流指令ベクトル（ $I_d^*$ 、 $I_q^*$ ）を決定することができ、ひいてはより正確にトルク指令 $T^*$ を実現することができる。すなわち、従来のように一般に非線形性が顕れない

低電流域で測定した  $d$ 、 $q$  軸一次インダクタンス  $L_d$ 、 $L_q$  を用いて制御を行った場合に比べ、より精度が高くなる。更に、図 3 に示されるルーチン  $IDIQCAL100$  においては、電流  $I_{ao}$  をできるだけ小さく抑えながらトルク指令  $T^*$  を実現できる  $I_d$ 、 $I_q$  を導出するという手順を採用しているため、モータ 10 に流れる電流を抑制することができ、よりエネルギー効率のよい装置が得られる。更に、線間電圧  $V_{ac}$  に関しバッテリー電圧相当値  $V_b \cdot \eta$  に基づく制限を施しているため、線間電圧  $V_{ac}$  がバッテリー電圧相当値  $V_b \cdot \eta$  を上回りインバータ 12 に負担がかかる等の支障が生じない。加えて、ステップ 112 において、 $d$ 、 $q$  各軸一次インダクタンス  $L_d$ 、 $L_q$  を導出するのではなく巻線 1 巻当り鎖交磁束数  $L_d I_d$ 、 $L_q I_q$  を導出し、更にステップ 114 ではこの鎖交磁束数  $L_d I_d$ 、 $L_q I_q$  をそのまま（すなわち  $I_d$  や  $I_q$  による除算を行わないで）利用しているため、 $d$ 、 $q$  各軸電流  $I_d$ 、 $I_q$  が微小な領域においても、0 に近い値での除算による誤差は生じない。

【0025】図 6 に、本発明の第 2 実施形態に係る装置の構成を示す。この実施形態においては、電流演算部 16 にルーチン  $IDIQCAL100$  を搭載するのに代えて、テーブル 300 を記憶するためのテーブル記憶部 26 を設けている。テーブル 300 は、トルク指令  $T^*$ 、モータ回転数  $N$  及びバッテリー電圧  $V_b$  の組合せ ( $T^*$ 、 $N$ 、 $V_b$ ) と、この ( $T^*$ 、 $N$ 、 $V_b$ ) を用いてルーチン  $IDIQCAL100$  を実行した場合に得られるであろう電流指令ベクトル ( $I_d^*$ 、 $I_q^*$ ) とを、対応付けるテーブルである。このように、あらかじめテーブル化乃至マップ化を行っておき、図 2 中のステップ 206 においてルーチン  $IDIQCAL100$  を実行するのに代えてこのテーブル 300 を参照することで、第 1 実施形態に比べ電流演算部 16 の負担を軽減することができ、またより高速な処理を実現することが可能になる。

【0026】図 7 に、本発明の第 3 実施形態における電流演算部 16 の動作の流れを示す。この実施形態は、第 1 実施形態と同様ルーチン  $IDIQCAL100$  を実行する実施形態である。図 7 に示されているのは、ルーチン  $IDIQCAL100$  のうち、本実施形態が第 1 実施形態と相違している部分である。この実施形態においては、電流演算部 16 は、ステップ 112 と前後してモータ逆起電力  $K_e \omega$  をモータ回転数  $N$  や  $d$ 、 $q$  各軸電流  $I_d$ 、 $I_q$  に基づき決定している (128)。図中、 $f_4$  は関数であり、前述の関数  $f_1$  等と同様事前の実験の結果に関し重回帰分析等を行うことにより導出することができる。電流演算部 16 は、第 1 実施形態におけるステップ 114 に代え、 $I_q$ 、 $L_d I_d$ 、 $L_q I_q$ 、 $K_e \omega$  に基づきかつ関数  $f_5$  によりトルク  $T$  を決定するステップ 114A を実行する。この関数  $f_5$  も、事前の実験及びその結果の解析によって得ることができる。

【0027】このように、本実施形態においては、 $d$ 、

$q$  各軸一次インダクタンス  $L_d$ 、 $L_q$  にあられる非線形性だけではなく、界磁起磁力  $K_e$  乃至はモータ逆起電力  $K_e \cdot \omega$  にあられる非線形性をも、電流指令ベクトル ( $I_d^*$ 、 $I_q^*$ ) の決定に反映させることができ、従って更に精度の高い制御を実行可能になる。

【0028】図 8 に、本発明の第 4 実施形態における電流演算部 16 の動作、特に第 4 実施形態におけるルーチン  $IDIQCAL100$  との相違部分を示す。この実施形態においては、更に、モータ一次抵抗  $R$  の値を、図示しない温度センサによって検出されるモータ 10 の周囲温度  $T_{emp}$  に応じかつ事前の実験により得られている関数  $f_6$  を利用して決定している (130)。ステップ 114A に代えて実行されるステップ 114B では、やはり実験及びその結果の分析によって得られる関数  $f_7$  を利用して、 $I_q$ 、 $L_d I_d$ 、 $L_q I_q$ 、 $K_e \omega$ 、 $R$  に基づきトルク  $T$  が決定される。従って、この実施形態によれば、更にモータ一次抵抗  $R$  の非線形性に関しても電流指令ベクトル ( $I_d^*$ 、 $I_q^*$ ) の決定に反映させることができ、従って更に精度の高い制御を実現することが可能になる。

【0029】図 9 に、本発明の第 5 実施形態における電流演算部 16 の動作の流れ、特に第 1、第 3 又は第 4 実施形態におけるルーチン  $IDIQCAL100$  との相違部分を示す。この実施形態においては、 $I_d$  により  $L_d I_d$  を、また  $I_q$  により  $L_q I_q$  をそれぞれ決定していたステップ 112 に代えて、 $I_d$  と  $I_q$  の組合せにより  $L_d L_q$  及び  $L_q I_q$  をそれぞれ決定するステップ 112A が実行される。図中、 $f_8$  及び  $f_9$  はいずれも実験及びその結果の解析によって得られる関数である。このような関数  $f_8$ 、 $f_9$  を用いることで、 $L_d I_d$  に対する  $I_q$  の影響や  $L_q I_q$  に対する  $I_d$  の影響をも、電流指令ベクトル ( $I_d^*$ 、 $I_q^*$ ) の決定に反映させることができ、より緻密な制御を実行可能になる。

【0030】また、これら第 3 乃至第 5 実施形態は、いずれも、第 2 実施形態と同様、テーブルを用いた構成へと変形することができる。この変形については、本願の開示内容を参照した当業者にとっては自明なことであろう。更に、以上の説明では電気自動車（いわゆるハイブリッド車を含む）への応用や、永久磁石励磁型の三相交流モータを前提としていたが、本発明が他の種類のシステムあるいは他の種類のモータへも適用できることはいうまでもない。また、以上の説明では実験結果について重回帰分析を行っていたが、本発明を実施するに際しては、非線形性をあらわす式を純粋に理論的に導出するようにしても構わないし、あるいは有限要素法解析等によって近似式が得られる場合には当該近似式を利用するようにしても構わない。

【0031】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、出力トルクの値がトルク指令に一致することとなるよ

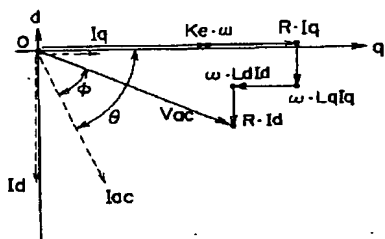
う、かつ、一次電流ベクトルによるd、q各軸一次インダクタンスの変動を表す情報を利用して、電流指令ベクトルを決定するようにしたため、一次電流ベクトルの変化によってd、q各軸一次インダクタンスに現れる変化が一次電流ひいては出力トルクに制御誤差をもたらすことがなくなり、従って従来に比べ精度の高い制御を実現できる。

【0032】更に、d軸若しくはq軸又は両軸の一次インダクタンスに対するモータ巻線単位巻き数当たり鎖交磁束数の関係を示す情報を、一次電流ベクトルによるd、q各軸一次インダクタンスの変動を表す情報として、用いることにより、d軸電流若しくはq軸電流が微小なときでも0に近い値での除算が生じることがなくなり、従って誤差を更に抑制することができる。

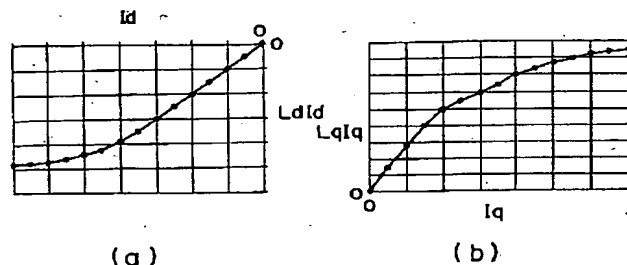
【0033】また、一次電流ベクトルによる界磁起磁力の変動を表す情報を併用して電流指令ベクトルを決定することにより、一次電流ベクトルの変化による界磁起磁力の変化によってモータの一次電流ひいては出力トルクに制御誤差がもたらされることがなくなり、従って更に精度の高い制御を実現できる。

【0034】更に、電源電圧、トルク指令及びモータ回転数の組合せと、決定された電流指令ベクトルに従いモータの一次電流 $I_{ac}$ をベクトル制御した場合にそのときのモータ回転数 $N$ においてモータの端子電圧が電源電圧相当値以下になりかつ一次電流ベクトルの絶対値又はd軸若しくはq軸成分が最小となるという条件を満たす一次電流ベクトルとを対応付ける情報を準備しておき、電流指令ベクトルの決定の際に利用することにより、電圧方程式中の係数の変動による誤差を抑えるという本発明の特徴に係る処理に加え、前掲の公報において実行されていた弱界磁制御（電源電圧相当値によるモータ端子電圧の制限を含む）を、テーブルの利用という簡便な手法により実現できる。これによって、装置構成が簡素に

【図4】



【図5】



なりまた電流指令決定手段における処理が簡素化・高速化する。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の一実施形態に係る装置の構成を示すブロック図である。

【図2】 この実施形態における電流演算部の動作の流れを示すフローチャートである。

【図3】 この実施形態におけるルーチンIDICALの流れを示すフローチャートである。

10 【図4】 モータ電圧・電流ベクトルの関係を示すベクトル図である。

【図5】 d、q各軸一次インダクタンス $L_d$ 、 $L_q$ の非線形性をあらわす実験結果及びその重回帰分析の結果により得た関数を示す図であり、図中“・”は実験により得た値を、曲線は重回帰分析によって得た関数をそれぞれ示し、また(a)はd軸一次インダクタンス $L_d$ の非線形性を、(b)はq軸一次インダクタンスの $L_q$ の非線形性をそれぞれ示す図である。

20 【図6】 本発明の第2実施形態に係る装置の構成を示すブロック図である。

【図7】 本発明の第3実施形態における電流演算部の動作の流れの一部を示すフローチャートである。

【図8】 本発明の第4実施形態における電流演算部の動作の流れの一部を示すフローチャートである。

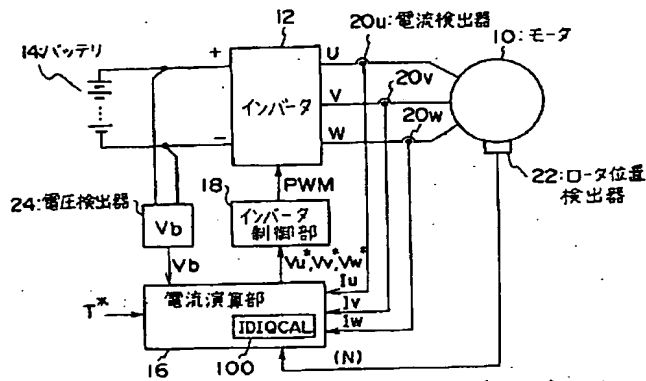
【図9】 本発明の第5実施形態における電流演算部の動作の流れの一部を示すフローチャートである。

【符号の説明】

10 モータ、12 インバータ、14 バッテリ、16 電流演算部、18 インバータ制御部、20 u、20 v、20 w 電流検出器、22 ロータ位置検出器、24 電圧検出器、100 ルーチンIDICAL、300 テーブル。

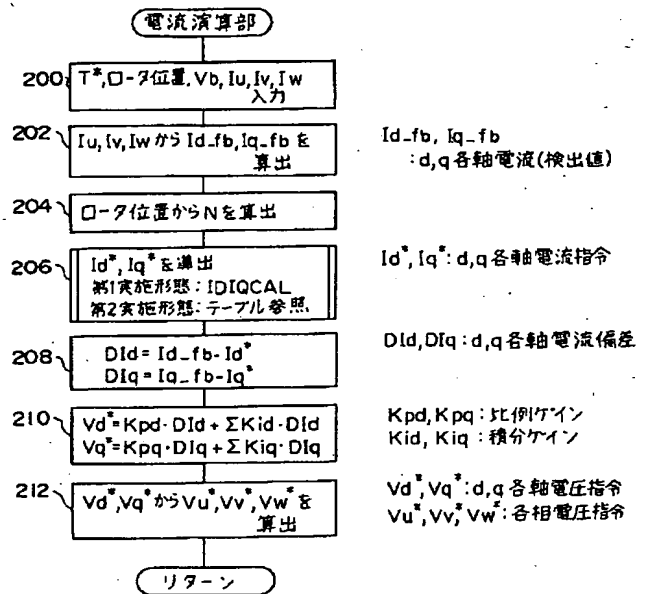


【図1】

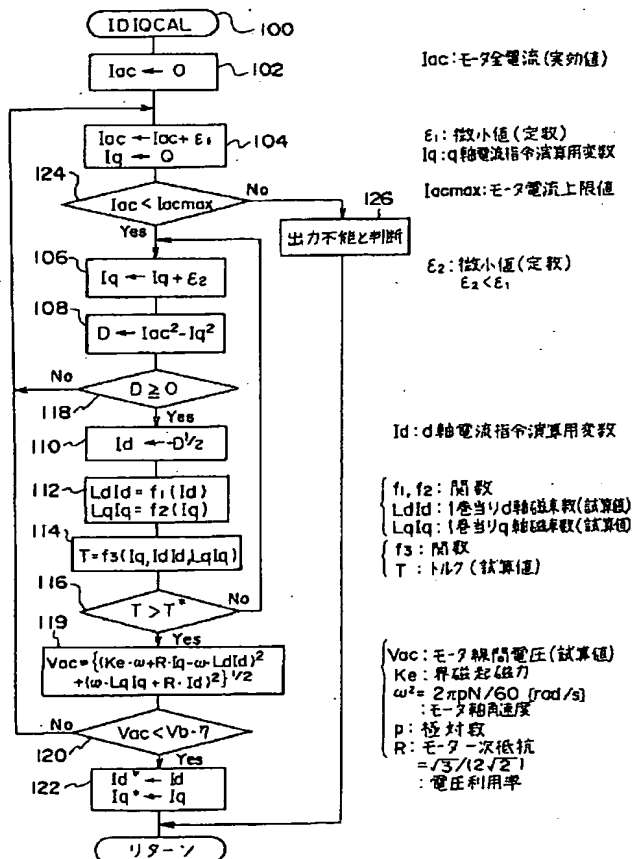


$T^*$ : トルク指令  
 $N$ : モータ回転数 (rpm)  
 $V_b$ : バッテリ電圧  
 $I_u, I_v, I_w$ : モータ各相電流  
 $V_u^*, V_v^*, V_w^*$ : 電圧指令  
 PWM: パルス幅変調された  
 スイッチング信号

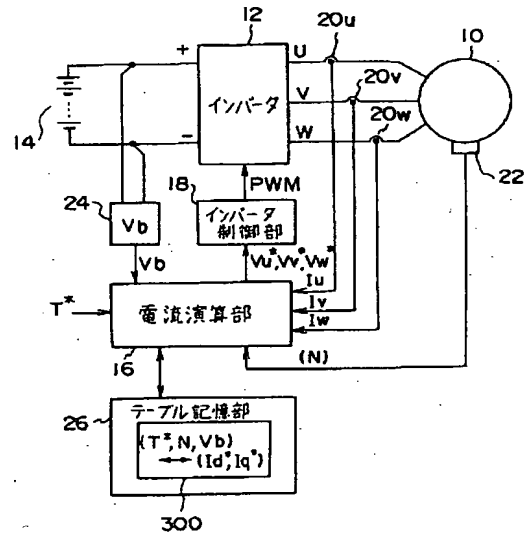
【図2】



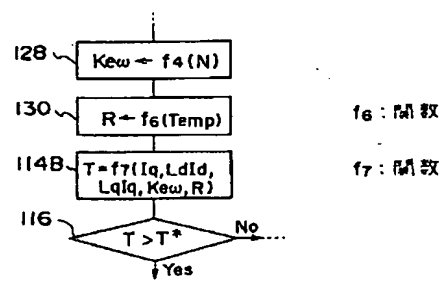
【図3】



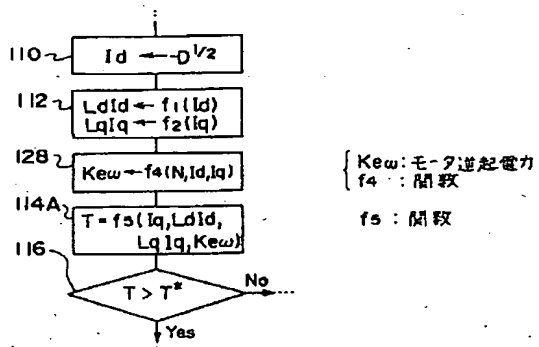
【図6】



【図8】



【図 7】



【図 9】

